

## The improvement of the ultracold neutrons rebuncher

Sohei Imajo <sup>#, A)</sup>, Yoshihisa Iwashita <sup>B)</sup>, Masaaki Kitaguchi <sup>C)</sup>, Hirohiko M. Shimizu <sup>C)</sup>, Yasushi Arimoto <sup>D)</sup>, Tamaki Yoshioka <sup>E)</sup>, Yoshichika Seki <sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa, Kyoto, 606-8502, Japan.

<sup>B)</sup> Institute of Chemical Research, Kyoto University, Uji, Kyoto, 611-0011, Japan.

<sup>C)</sup> Department of Physics, Nagoya University, Chikusa, Nagoya, 464-8602, Japan.

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Organization, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801, Japan.

<sup>E)</sup> Department of Physics, Kyushu University, Hakozaki, Fukuoka, 812-8581, Japan.

<sup>F)</sup> RIKEN, Wako, Saitama, 351-0198, Japan.

### Abstract

We have demonstrated that the UCN rebuncher can control the velocities of ultracold neutrons and focus the UCNs on the detector temporally. However, the focusing efficiency of the rebuncher is low and the kinetic energy range of UCNs which the rebuncher can manipulate is narrow. At present, we are developing a new rebuncher to solve these problems.

## 超冷中性子リバンチャーの改良

### 1. 超冷中性子リバンチャー概要

時間反転対称性を直接破る現象の探索や素粒子標準理論を超える物理の探索を目的として数十年にわたり中性子の電気双極子モーメント (Electric Dipole Moment - EDM) の測定が続けられてきた。クォークの電荷の相殺漏れなどが原因で中性子が EDM を持てば、時間反転操作において向きが逆転するスピンの兼ね合いで中性子は時間反転操作に対して非対称な存在となる。また、標準理論が予言する中性子 EDM の大きさは  $10^{-30} \sim 10^{-32} \text{ e}\cdot\text{cm}$  であるが、たとえば超対称性理論では  $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e}\cdot\text{cm}$  の周囲に値を持つと予言しており、そのような大きな有限値の EDM を発見できれば新しい物理の存在を強く示唆することになる。現在中性子 EDM の上限値はフランスの ILL で得られたもので、 $2.9 \times 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$  (90% C.L.) である<sup>[1]</sup>。

現在中性子 EDM の測定では 200 neV 程度にまで減速した超冷中性子 (UltraCold Neutrons - UCN) を用いるのが一般的である。UCN は 60 nm 以上の長いド・ブroy波長をもつためニッケル鏡面などで全反射させることができる。この性質を利用してスピン偏極させた UCN を物質容器に貯蔵して、容器内に静電場と静磁場を平行および反平行にかけた際のスピンの運動を比較することで中性子 EDM の大きさを測定する。この測定は  $10^{-12} \text{ T}$  の磁場が  $10^{-27} \text{ e}\cdot\text{cm}$  の EDM とみなされるほど精密なものとなるため、系統誤差を低減させるために実験容器はできるだけ小さくしなければならない。したがって実験の統計量の向上には貯蔵する UCN の密度を大きくすることが非常に重要となってくる。現在 PSI では EDM 測定を目指して  $1000 \text{ UCN/cm}^3$  以上の粒子数密度の UCN を生成する核破砕中性子源を開発中である<sup>[2]</sup>。

我々NOP (Neutron Optics and Physics) グループも

図1に示すようにJ-PARCに  $3000 \text{ UCN/cm}^3$  以上の UCN を生成する核破砕中性子源を新設して上記のような実験を行い、 $10^{-27} \sim 10^{-28} \text{ e}\cdot\text{cm}$  の中性子 EDM を測定することを提案している<sup>[3]</sup>。UCN は輸送方向に様々な速度を持つので、パルスビーム運転である J-PARC では生成直後の高密度の UCN バンチは輸送の過程で大きく拡散し、何も対策を講じなければ実験容器中での UCN 密度が大きく損なわれてしまう。そこで我々はこの計画の重要な要素の一つとして UCN の速度を制御し UCN の拡散を抑え込む装置“UCN リバンチャー”を開発した。

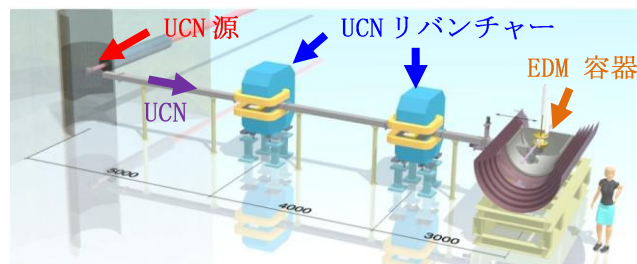


図1: J-PARC における EDM 実験のセッティング。

UCN リバンチャーは中性子の磁気モーメントと磁場との相互作用を利用した中性子加速器である。磁気モーメント  $\mu$  を持つ中性子は磁場  $\mathbf{B}$  中で  $-\mu \cdot \mathbf{B}$  で表されるポテンシャルエネルギーを持ち、これは磁場 1 T あたりおよそ 60 neV の大きさに相当する。中性子に対するエネルギー保存則を考えると、これは中性子の運動エネルギー変化を意味する。このとき作用する力は保存力だが、図2に示すように磁場通過後に中性子のエネルギー変化が打ち消されないように磁場中にスピンフリップパーを設置してスピンを反転させれば中性子の運動エネルギーを最大で 120 neV/T 増減させることが可能となる<sup>[4][5]</sup>。そこで位置に対してなだらかな勾配を持つ磁場を用

い、前もって測定した UCN の速度分布を基にねらった速度の UCN がねらった磁場の大きさの地点にいる瞬間にスピン反転を生じさせることで輸送方向に対する中性子集団の拡散方向を制御する。最終的に図 3 に示すように光学レンズのように実験容器地点に UCN を時間的に集束させることが本装置の開発目標である。

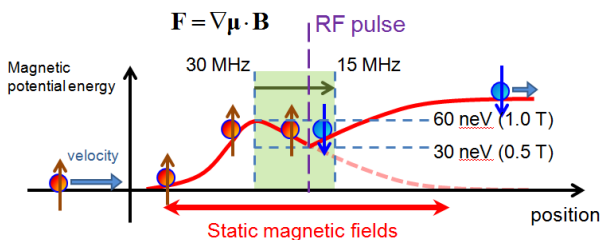


図 2: 磁場による中性子の速度制御。

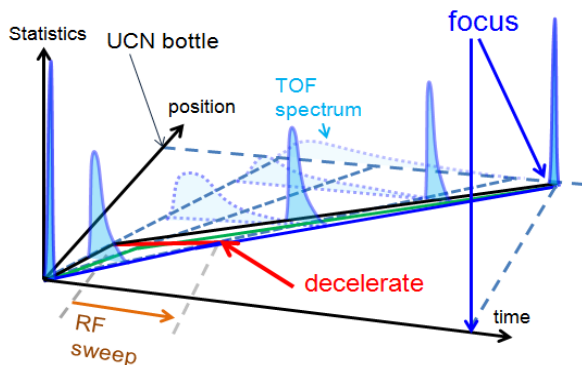


図 3: UCN の時間的集束。

スピントリッパーには共鳴スピントリッパーを用いた。中性子の磁気モーメントを  $\mu_n$ 、中性子の輸送方向に垂直な静磁場の強さを  $B_z$ 、プランク定数を  $\hbar$  とすると、スピン反転を生じさせる共鳴周波数 (Larmor 周波数)  $\omega_s$  は以下のように書ける。

$$\omega_s = 2|\mu_n|B_z \frac{1}{\hbar}$$

したがって印加する高周波磁場の周波数を変化させればスピン反転に適した磁場  $B_z$  の大きさが変化し、その結果 UCN に生じる加減速量が変化する。周波数は磁場 1 T に対して約 30 MHz である。我々の EDM 実験では UCN の到達に合わせて 6 MHz ~ 30 MHz まで周波数を掃引する予定である。

可変周波数の高周波磁場を発振するために我々は図 4 に示すような可変コンデンサ  $C_r$  と一巻きコイル  $L$  を組み合わせた LC 共振回路からなる共振器を試作した。15 MHz ~ 30 MHz の磁場発振を目指した。さらに共振回路の直前に可変コンデンサ  $C_c$  を組み込んでこれら二つの可変コンデンサの容量をモーターで制御し、 $C_r$  の容量で決まる共振状態のもとで共振器全体のインピーダンスが入力 50  $\Omega$  に対して整合するよう  $C_c$  の容量を調整して高周波電力を印加した。

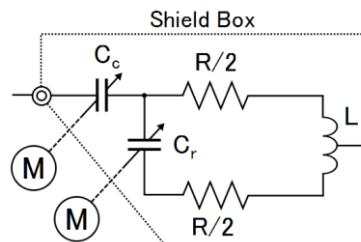


図 4: 共振器の回路図。

静磁場の発生には異方性中間磁極を備えた電磁石を使用した<sup>[6][7]</sup>。この磁石は図 5 に示すように中間磁極の効果で 1 T から 0.2 T まで 25 cm にわたってほぼ一様な磁場勾配を実現している。このような磁場勾配を用いるため、UCN のスピン反転には高速断熱通過型の NMR と同じ手法を採用した。この過程は振動磁場まわりのスピンの歳差周波数に対して静磁場の時間変化が十分に小さいときに成立するものであり、静磁場の大きさを  $B_0$ 、振動磁場の大きさを  $B_1$ 、中性子の磁気回転比を  $\gamma$ 、UCN の速度を  $v$ 、UCN の輸送方向を  $x$  とすると断熱通過の成立条件は

$$k = \frac{\gamma B_1^2}{dB_0/dt} = \frac{\gamma B_1^2}{v dB_0/dx} \gg 1$$

と表される。このとき  $k \geq 1.4$  であればスピン反転率は 90 % 以上になると計算され<sup>[8]</sup>、我々の電磁石のもとでは必要な  $B_1$  の大きさは 5 m/s の UCN に対して 1.1 mT 以上となる。我々はこの高周波磁場出力を得るために共振器に対して 1 kW の電源アンプを使用した。コンデンサの耐圧と容量の向上のために  $C_r$  を常温での比誘電率が約 2.7 のシリコンオイル KF-96 の水槽内に設置した。

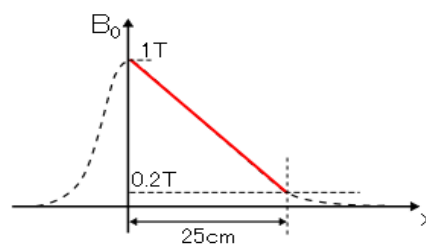


図 5: 異方性中間磁極の作る磁場分布の概形。

本装置の原理実証実験は 2011 年 11 月にフランスの ILL で行われた<sup>[9]</sup>。共振器内での放電やモーターのトルク不足、 $C_c$  の容量不足等のトラブルに見舞われ、最終的に高周波磁場の周波数も 17.5 MHz ~ 28.6 MHz と狭くなったものの、5 m/s 周辺の UCN を減速することで集束時点の統計量を 1.4 倍に増加させることに成功し、UCN 集束の原理実証としては十分な成果が得られた。スピン反転率はインピーダンス整合が不十分だったため電力が反射されて高周波磁場の出力が上がらず、50 % 程度となった。またモーターのトルク不足で  $C_r$  の容量の時間変化が理想値の粗い近似しかできなかったため、

集束によって生じたピークの幅は入力した UCN パルスの 10 倍程度となった。

我々は現在、図 6 に示すような 2 号機を試作し、これらの問題点の解決に向けた改良を続けている。

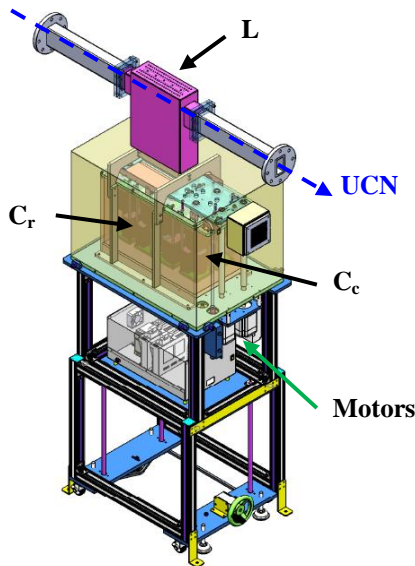


図 6: リバンチャー 2 号機。

## 2. 超冷中性子リバンチャーの現状

試作した 2 号機には  $C_r$  として 19 pF ~ 406 pF の可変コンデンサを 6 個並列に接続した。また  $C_c$  として同型の可変コンデンサを 2 個並列に接続して搭載した。放電対策として電流はコンデンサのローターには流さずステーターのみに流し、疑似的なバタフライ型バリコンとして機能させた。2 号機では  $C_c$  もオイル漬けにした。写真を図 7 に示す。

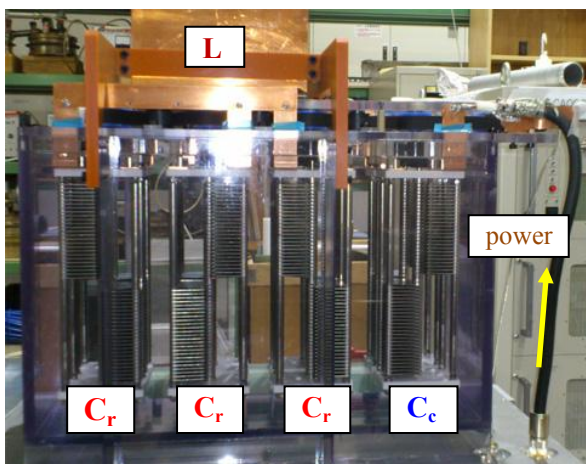


図 7: 実際に作成された共振回路。

ネットワークアナライザを用いて反射電力の最小点に注目して共振周波数の測定を行ったところ、 $C_c$  の最低容量が必要容量の下限を大幅に超過しており、どの  $C_r$  数においても約 10 MHz 以上の周波数でインピーダンス整合が取れないことがわかった。そこ

で小さな容量のコンデンサを  $C_c$  に直列接続して容量を下げてもインピーダンス整合を行ったところ、容量変化はオイル漬けの状態でも 10 pF ~ 300 pF 程度必要であり、現状の  $C_c$  に対して容量を 1/10 程度にしなければならないことがわかった。

インピーダンス整合をとったそれらの状態で周波数変化を測定したところ、磁場周波数は 5.4 MHz ~ 28.7 MHz となった。周波数の上限値を 30 MHz に近付けるためにコイル L に対する  $C_r$  の接続を 2 個ずつ解除したところ、磁場周波数はコンデンサ 4 個では 5.9 MHz ~ 31.2 MHz, コンデンサ 2 個では 6.7 MHz ~ 34.6 MHz となった。LC 回路の共振周波数は単純には  $1/(2\pi\sqrt{LC})$  と書けるが、測定結果はこの式に従っていない。この原因はコンデンサの接続を解除した際に共振器全体のインダクタンスが大きく変化するためだと思われる。

磁場周波数に対する  $C_c$  の必要容量変化と可変コンデンサのローター回転角度に対する磁場周波数変化のプロットは図 8 および図 9 のようになった。

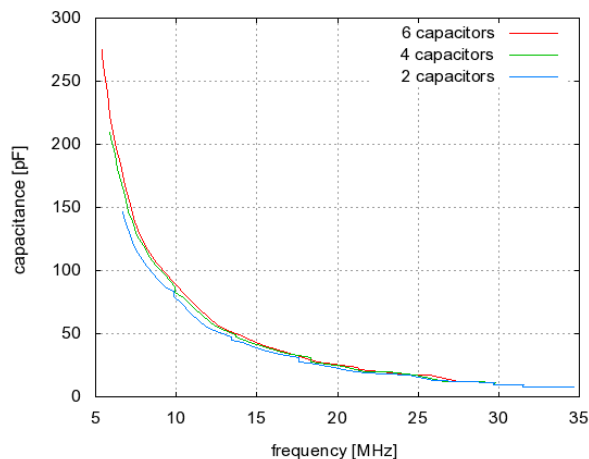


図 8: 周波数に対する  $C_c$  の必要容量の変化。

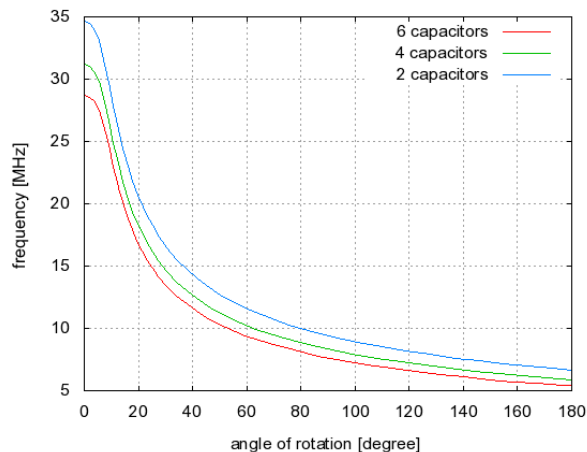


図 9: ローターの回転角度に対する磁場の周波数変化。

### 3. 今後の改良

高周波磁場の周波数上限を最終目標である 30 MHz 以上にし、それと同時に  $C_r$  を回転させるモーターのトルクの負担を減らすために  $C_r$  の個数を半分の 3 個に減らす予定である。周波数の下限は 6.5 MHz 周辺の値をとると推測されるが、低周波数帯の減速に対応する UCN は存在率の小さい低速のものであるため、次の改造では周波数の上限の拡張を優先する。また  $C_c$  に必要な容量は現状のおよそ 1/10 であり、最小容量に対する最大容量比は約 30 倍であるため、 $C_c$  は再作成を行う必要がある。これらの更なる改良が済み次第、実験に向けたモーターの回転制御の具体的な検討および高周波電力の印加試験を行う。

### 4. 参考文献

- [1] C. A. Baker, et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 131801 (2006).
- [2] <http://www.triumf.ca/sites/default/files/SEEC-UCN.pdf>
- [3] Proposal to J-PARC, [http://j-parc.jp/jhf-np/pac\\_1001/pdf/KEK\\_J-PARC-PAC2009-11.pdf](http://j-parc.jp/jhf-np/pac_1001/pdf/KEK_J-PARC-PAC2009-11.pdf)
- [4] B. Alfeld, G. Badurek, and H. Rauch, Z. Physik B41, 231 (1981).
- [5] H. Weinfurter, et. al., Z.Physik B 72, 195 (1988).
- [6] Y. Arimoto, et. al., Physica Procedia **17**, 20-29 (2011).
- [7] Y. Arimoto, et. al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** 4500704.
- [8] S. V. Grigoriv, et. al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **384**, 451-456 (1997).
- [9] Y. Arimoto, P. Geltenbort et. al., Phys. Rev. A **86**, 023843 (2012).